

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC**

**PHẠM THỊ MAI HIÊN**

**NGHIÊN CỨU SỰ MỞ RỘNG VÙNG TẦN SỐ  
CHIẾT SUẤT ÂM SỬ DỤNG CẤU TRÚC LƯỚI ĐĨA ĐA LỚP  
DỰA TRÊN SIÊU VẬT LIỆU**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ**

**THÁI NGUYÊN - 2019**

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC**

**PHẠM THỊ MAI HIÊN**

**NGHIÊN CỨU SỰ MỞ RỘNG VÙNG TẦN SỐ  
CHIẾT SUẤT ÂM SỬ DỤNG CẤU TRÚC LƯỚI ĐĨA ĐA LỚP  
DỰA TRÊN SIÊU VẬT LIỆU**

**Ngành: Quang học**

**Mã số: 8440110**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ**

**Người hướng dẫn khoa học: TS. NGUYỄN THỊ HIỀN**

**THÁI NGUYÊN - 2019**

## LỜI CẢM ƠN

Em xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới Cô giáo TS. Nguyễn Thị Hiền - Khoa Vật lý và Công nghệ - Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên về sự hướng dẫn, chỉ bảo tận tình của Cô trong suốt quá trình em thực hiện luận văn tốt nghiệp này.

Em xin gửi lời cảm ơn tới các Thầy, Cô giáo trong Khoa Vật lý và Công nghệ - Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên - những người thầy đã trang bị cho em những kiến thức quý báu trong thời gian em học tập, nghiên cứu tại trường.

Để thực hiện đề tài này, em xin cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài nafosted “Chế tạo và nghiên cứu siêu vật liệu đa dải tần dựa trên các mô hình tương tác”, mã số: 103.99-2018.35.

Cuối cùng, em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến bạn bè, người thân - những người luôn bên cạnh động viên, giúp đỡ trong thời gian em học tập và thực hiện luận văn tốt nghiệp này.

*Thái Nguyên, tháng 10 năm 2019*

**Học viên**

**Phạm Thị Mai Hiền**

## MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN .....	i
MỤC LỤC .....	ii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT .....	iv
DANH MỤC CÁC HÌNH .....	v
<b>MỞ ĐẦU</b> .....	1
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ SIÊU VẬT LIỆU</b> .....	3
1.1. Giới thiệu chung về siêu vật liệu.....	3
1.2. Tổng quan về siêu vật liệu có chiết suất âm .....	7
1.2.1. Vật liệu có độ điện thẩm âm .....	8
1.2.2. Vật liệu có độ từ thẩm âm .....	10
1.2.3. Vật liệu có chiết suất âm .....	13
1.2.4. Ứng dụng của siêu vật liệu.....	16
1.3. Mô hình lai hóa trong siêu vật liệu .....	21
1.3.1. Mô hình lai hoá bậc một ứng với cấu trúc CWP .....	21
1.3.2. Mô hình lai hóa bậc hai ứng với cấu trúc CWP hai lớp.....	24
<b>CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU</b> .....	28
2.1. Lựa chọn cấu trúc và vật liệu .....	29
2.2. Phương pháp mô phỏng .....	30
2.3. Phương pháp tính toán dựa trên mô hình mạch điện LC .....	31
2.3.1. Mô hình lai hóa bậc hai cho cấu trúc lưới đĩa hai lớp.....	31
2.3.2. Tính toán hai tần số tách ra theo mô hình lai hóa bậc hai cho cấu trúc lưới đĩa hai lớp dựa trên mạch điện LC .....	32
2.4. Phương pháp thực nghiệm .....	34
2.4.1. Xây dựng hệ thiết bị chế tạo mẫu .....	34
2.4.2. Quy trình chế tạo mẫu .....	35
2.4.3. Thiết kế hệ đo.....	36
2.5. Xử lý và phân tích số liệu .....	37

<b>CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN</b> .....	39
3.1. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa đa lớp ở vùng GHz.....	39
3.1.1. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa hai lớp.....	39
3.1.2. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa đa lớp .....	50
3.2. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa đa lớp ở vùng quang học.....	56
3.2.1. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa đa lớp ở các vùng tần số khác nhau .....	56
3.2.2. Nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa đa lớp ở vùng quang học .....	57
<b>KẾT LUẬN CHUNG</b> .....	61
<b>HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO</b> .....	62
<b>CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ</b> .....	63
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO</b> .....	64

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT

<b>Ký hiệu</b>	<b>Tên đầy đủ</b>
SRR	Vòng cộng hưởng
CW	Dây kim loại bị cắt
CWP	Cặp dây bị cắt
LH	Quy tắc bàn tay trái
LHMs	Vật liệu tuân theo quy tắc bàn tay trái
Meta	Siêu vật liệu
RH	Quy tắc bàn tay phải
M	Độ hỗ cảm
E	Vector điện trường
H	Vector từ trường
K	Vector sóng
$\tan\delta$	Hệ số tổn hao của điện môi
TE	Sóng phân cực với vector điện trường vuông góc với mặt phẳng tới
TM	Sóng phân cực với vector từ trường vuông góc với mặt phẳng tới

## DANH MỤC CÁC HÌNH

<b>Hình 1.1.</b> Sự tương quan giữa cấu trúc của vật liệu truyền thống và siêu vật liệu.....	4
<b>Hình 1.2.</b> Sơ đồ mô tả các tín hiệu phát (a) và tín hiệu thu (b) từ hai phía môi trường. ....	7
<b>Hình 1.3.</b> (a) Cấu trúc lưới dây kim loại mỏng sắp xếp tuần hoàn và (b) độ điện thẩm hiệu dụng của lưới dây bạc theo tần số với $r = 5 \mu\text{m}$ , $a = 40 \text{ mm}$ và độ dẫn của bạc là $\sigma = 6,3 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ .....	9
<b>Hình 1.4.</b> Sơ đồ cấu trúc của vòng cộng hưởng có rãnh (Split Ring Resonator - SRR) và các cấu trúc SRR trong dãy tuần hoàn .....	10
<b>Hình 1.5.</b> Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra $\mu < 0$ .....	11
<b>Hình 1.6.</b> Dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả thiết là vật liệu không có tổn hao .....	12
<b>Hình 1.7.</b> a) Cấu trúc SRR và phân cực của sóng điện từ; b) Sự biến đổi từ cấu trúc SRR thành cấu trúc cặp dây bị cắt (cut-wire pair - CWP)....	13
<b>Hình 1.8.</b> a) Cấu trúc SRR; cấu trúc dây kim loại bị cắt (CW), định hướng của điện trường ngoài; b) Mô hình mạch điện LC tương đương.....	13
<b>Hình 1.9.</b> Biểu đồ giải thích phần thực âm của chiết suất. Các mũi tên cho thấy vị trí của độ điện thẩm $\epsilon$ và độ từ thẩm $\mu$ trong mặt phẳng phức. ....	14
<b>Hình 1.10.</b> (Trái) a) Cấu trúc ERR, b) Cấu trúc CW và c) Ô cơ sở của MPA dựa trên 2 cấu trúc cộng hưởng cùng với sự phân cực của sóng tới. (Phải) Phổ hấp thụ mô phỏng (nét liền), thực nghiệm (chấm tròn) và tính toán theo hàm Gauss dựa trên kết quả thực nghiệm (nét đứt, xám). Hình đính kèm là kết quả mô phỏng độ hấp thụ tại tần số cộng hưởng tại các giá trị góc tới khác nhau.....	16

<b>Hình 1.11.</b> Mẫu chế tạo siêu vật liệu ở a) dạng 3 chiều và b) dạng phẳng ..	18
<b>Hình 1.12.</b> Thí nghiệm hệ WPT đối với bóng đèn 40 W khi a) không sử dụng siêu vật liệu, có sử dụng siêu vật liệu b) dạng 3 chiều và c) dạng phẳng.....	19
<b>Hình 1.13.</b> Nguyên tắc hoạt động của siêu thấu kính dựa trên siêu vật liệu có chiết suất âm. ....	20
<b>Hình 1.14.</b> Nguyên lý hoạt động của áo choàng tàng hình. ....	20
<b>Hình 1.15.</b> (a) Cấu trúc CWP, (b) giản đồ lai hóa, (c) phổ truyền qua của cấu trúc một CW và một cặp CW ( CWP) .....	22
<b>Hình 1.16.</b> Phân bố của điện trường và từ trường tương ứng với cộng hưởng a), b) đối xứng và c), d) bất đối xứng của cấu trúc CWP có hai thanh bằng vàng chiều dài 300 nm bề dày 10 nm và cách nhau 40 nm.....	23
<b>Hình 1.17.</b> a) Ô cơ sở của cấu trúc CWP hai lớp b) mặt cắt của cấu trúc CWP hai lớp và c) mô hình lai hóa bậc hai đề xuất với cấu trúc này .....	24
<b>Hình 1.18.</b> Phổ truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ phụ thuộc vào khoảng cách giữa 2 CWP .....	26
<b>Hình 1.19.</b> Sự phụ thuộc của độ từ thẩm vào tỉ số $d/t_d$ của 2 CWP .....	27
<b>Hình 2.1.</b> Sơ đồ tiến trình nghiên cứu. ....	28
<b>Hình 2.2.</b> (a) Cấu trúc lưới đĩa hai lớp cùng với phân cực của sóng điện từ chiếu đến $\mathbf{E}(y)$ , $\mathbf{H}(x)$ , $\mathbf{k}(z)$ , (b) Mẫu chế tạo (c) Phép đo đạc.....	29
<b>Hình 2.3.</b> Mô hình lai hóa bậc hai cho cấu trúc lưới đĩa hai lớp.....	32
<b>Hình 2.4.</b> Hệ thiết bị chế tạo siêu vật liệu đặt tại phòng Thí nghiệm trọng điểm Viện Khoa học Vật liệu. ....	34
<b>Hình 2.5.</b> Quy trình chế tạo siêu vật liệu hoạt động ở vùng GHz.....	35
<b>Hình 3.1.</b> Phổ truyền qua (a) Thực nghiệm và (b) mô phỏng của DD MMs phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp $d$ với $t_d = 1,27$ mm. Phần thực của (c) chiết suất, độ điện thẩm $\epsilon$ và độ từ thẩm $\mu$ khi (d) $d = 3,6$ mm, (e) $d = 2,0$ mm và (f) $d = 1,2$ mm. (g) Mô phỏng phân bố dòng khi $d = 1,2$ mm tại 14,81 GHz và 15,16 GHz. .	41



<b>Hình 3.2.</b> Mô phỏng phân bố (a, b) năng lượng cảm ứng từ và (c, d) năng lượng cảm ứng điện tại hai đỉnh truyền qua khi $d = 1,2$ mm. ....	42
<b>Hình 3.3.</b> Phổ truyền qua (a) Thực nghiệm và (b) Mô phỏng của DD MM phụ thuộc vào chiều dày lớp điện môi $t_d$ trong khi khoảng cách lớp cố định là $d = 1,2$ mm. Phần thực của (c) chiết suất $n$ , độ điện thẩm $\epsilon$ và độ từ thẩm $\mu$ khi (d) $t_d = 1,91$ mm, (e) $t_d = 1,6$ mm và (f) $t_d = 1,27$ mm. ....	46
<b>Hình 3.4.</b> Ảnh hưởng của góc tới lên phổ truyền qua, phần thực của chiết suất, độ điện thẩm và từ thẩm dưới mode phân cực (a), (c) TE và (b), (d) TM. ....	47
<b>Hình 3.5.</b> Ảnh hưởng của tổn hao điện môi lên phổ truyền qua của cấu trúc lưới đĩa. ....	49
<b>Hình 3.6.</b> Ô cơ sở của cấu trúc lưới đĩa (a) ba lớp và mặt cắt dọc của cấu trúc lưới đĩa (b) ba lớp có lớp thứ nhất, (c) thứ hai và (d) thứ ba bị nối tắt. ....	50
<b>Hình 3.7.</b> (a) Phổ truyền qua (phía trên) và phần thực chiết suất (phía dưới) (b) Phần thực độ từ thẩm, điện thẩm của cấu trúc lưới đĩa ba lớp, cấu trúc lưới đĩa ba lớp có lớp thứ nhất, thứ hai và thứ ba bị nối tắt. ....	51
<b>Hình 3.8.</b> Giảm đồ lai hóa cho cấu trúc cặp đĩa ba lớp. ....	53
<b>Hình 3.9.</b> Phân bố dòng tại các đỉnh cộng hưởng từ trong các trường hợp: cấu trúc cặp đĩa ba lớp (a) chưa bị nối tắt (b) nối tắt lớp thứ nhất (c) nối tắt lớp thứ hai và (d) nối tắt lớp thứ ba. ....	54
<b>Hình 3.10.</b> Mô phỏng phổ truyền qua dựa theo số lớp khác nhau của cấu trúc lưới đĩa. ....	56
<b>Hình 3.11.</b> Phổ truyền qua và phần thực của chiết suất, độ từ thẩm, điện thẩm của cấu trúc lưới đĩa hoạt động ở các tần số khác nhau (a) 13,5-17 GHz, (b) 135-170 GHz, (c) 1,35-1,7 THz và (d) 13,5-17 THz. ....	57

**Hình 3.12.** (a) Phụ thuộc của phổ truyền qua của cấu trúc lưới đĩa hai lớp vào độ dẫn kim loại ở vùng quang học. (b) mô phỏng dòng tại các đỉnh tách ra khi tăng độ dẫn kim loại gấp 3 lần Ag..... 58

**Hình 3.13.** Phụ thuộc của phổ truyền qua của cấu trúc lưới đĩa mười lớp vào độ dẫn kim loại ở vùng quang học. .... 59